2005년도 추계 학술발표대회 발표논문, 2005년 11월, 경남 산청

하이브리드 용접부의 역학적 거동 규명

Examination on the Mechanical Behavior of Hybrid Laser-MIG Weld

오종인, 박호경**, 방한서*, 방희선*, 석한길*****

* 조선대학교 공과대학 항공·조선공학부

** 조선대학교 일반대학원 선박해양공학과

*** 삼척대학교 공과대학 재료금속공학과

ABSTRACT : *Recently many research are going on in the field of application of Laser-Arc hybrid welding for superstructures such as ship-structures, transport vehicles etc. However, the study on heat distribution and welding residual stress of hybrid weld by numerical simulation leaves much to be desired. Therefore in this study an optimized welding condition and numerical simulation for hybrid welding by using previous numerical analysis which is used to calculate the heat source for hybrid welding has been analyzed.*

1. 서 론

최근 선박과 같은 대형 구조물 제조 공정에 하이브리드 용접법을 적용하려는 노력이 이루어지고 있고 이에 대한 지속적인 연구를 하고 있으나 현재까지 하이브리드 용접부에 대한 용접성을 파악할 수 있는 수치해석 연구가 아크용접에 비해 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 선박 제조시 사용되고 있는 조선용 강재 A-grad 강판에 대하여 하이브리드 용접 시험편을 제작하고 시험편 제작시 사용된 용접조건과 하이브리드 용접 특성을 고려하여 선정한 용접열원모델을 이용하여 열적 특성 및 용접잔류응력을 수치 해석하였으며 용접 시험편에 잔류응력 및 기계적 강도 특성(인장, 충격 등)을 측정하여 비교 검토함으로써 하이브리드 용접부의 최적의 용접조건을 제시하고 용접성 및 재현성을 확보하고자 하였다.

2. 해석 및 실험 조건

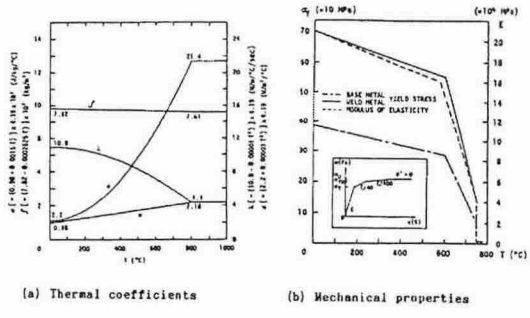
2.1 해석 조건

본 연구에서는 4절점 Isoparametric 요소를 사용하고 용접열원을 순간열원으로 가정하여 수치 해석하였고 이때 사용된 용접조건은 실제 시험편을 제작하기 위해 사용되었던 조건을 고려하였으며 이는 Table 1에 나타내었다.

해석시 사용된 강의 재질로는 조선용 강재 A-grad를 사용하였고 용융지의 유동, 키홀 내부의 증발현상, 잠열 및 금속 상변태는 고려하지 않았으며 고려된 재료의 실제 온도 의존성 물리정수 및 기계적 물성치를 Fig. 1에 나타내었다. 또한, 모델의 열 및 열탄소성 해석을 위하여 자체 개발한 유한요소 프로그램을 사용하였고 실제 용접현상을 고려한 분리형 Volume - Volume heat source를 용접열원 모델로 선정하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Hybrid Welding Condition

Specimen Number		1	2	3
GMAW	Voltage(V)	20	25.2	30
	Current(A)	198	292	378
CO_2 Laser	Power(KW)	8		
Welding speed(m/min)		1.5		
Wire feeding speed		6	9.9	14.1
Material		조선용 강재 A-grad		
Joint type		Butt		
Gas		He50%, Ar28%, $CO_2$12%		



(a) Thermal coefficients (b) Mechanical properties

Fig.1 Temperature dependency of material property

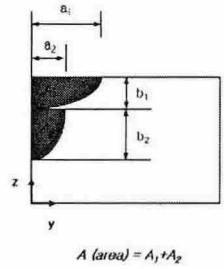


Fig.2 Schematic diagram of heat source

시험편의 해석을 위하여 사용되어진 모델 형상은 Fig. 3에 보인 것과 같이 전체모델(총 절점수 1965개, 총 요소수 1820개, 최소 요소크기 0.2㎜×0.5㎜)을 이용하였으며 열탄소성 해석의 경계 조건은 각각 Fig. 4에 나타내었다.

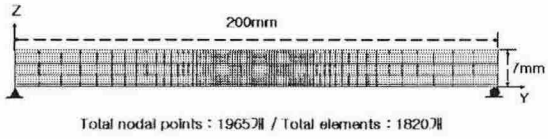


Fig.3 Schematic mesh division

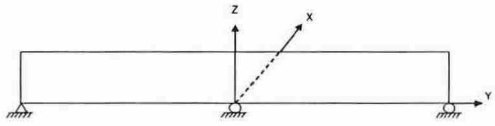


Fig.4 Boundary condition for thermal elasto-plastic analysis

용접열원모델에 대한 입열량을 계산하기 위해 다음의 식 (1)와 식 (2)를 사용하였으며, 각 용접법에 따른 용접효율은 CO_2레이저의 경우 35%, GMAW의 경우 80%로 하였다.

CO_2 Laser(Uniform cylinder flux)

$$Q = \eta_L \frac{P}{1000 \cdot W_s} \quad (1)$$

여기서, Q: 용접입열(KJ/cm) η_L: 레이저 용접효율
P: 레이저 출력(kW) W_s: 용접속도(cm/sec)

GMAW(Uniform flux)

$$Q = \eta_A \frac{V \cdot I}{1000 \cdot W_s} \quad (2)$$

여기서, η_A: 아크용접효율 V: 용접전압(V)
I : 용접전류(A)

2.2 실험 조건 및 방법

하이브리드 용접시험편에 대하여 스트레인게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그 값을 수치해석 결과와 비교해 보았다. Fig. 5는 잔류응력측정을 위한 스트레인게이지를 부착한 사진을 보여주고 있다. 또한 하이브리드 용접부에 대한 기계적 강도특성을 알아보기 위해 각종 성능시험(인장, 샤르피 충격 테스트 및 경도 측정)을 실시하였다.

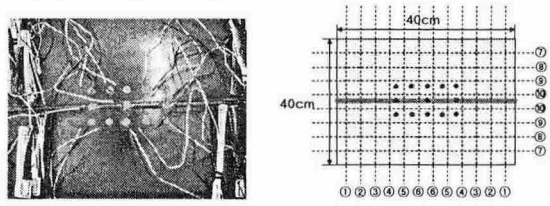
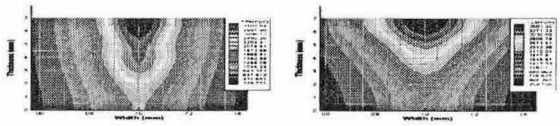


Fig. 5 Measurement of Residual Stress by Strain gauge

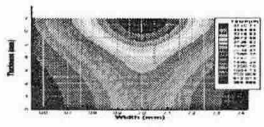
3. 해석결과 및 고찰

3.1 용접열분포 특성

본 연구에서는 3가지 Hybrid 용접부에 대한 열분포 해석을 수행하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 결과를 살펴보면 용접열원을 중심으로 폭 방향으로 열전달이 되는 것을 알 수 있으며 전류의 크기가 커질수록 용융부의 최고온도가 더 높고 용착금속부 및 열영향부의 영역이 훨씬 넓게 형성됨을 볼 수 있다. 또한, 실제 하이브리드 용접부에서의 열거동과 흡사함을 보였다.



(a) Specimen1 (b) Specimen 2



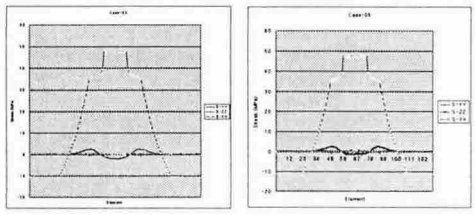
(c) Specimen 3

Fig. 6 Contour of Heat Distribution

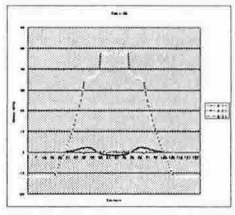
3.2 용접잔류응력 분포 특성

Fig. 7은 각 용접법에 의한 열탄소성 해석 후 표면으로부터 0.5㎜지점에 대한 용접잔류응력 분포를 나타낸 그림이다. 이 때 용접잔류응력 분포 특성을 보면 용접선 길이방향 성분인 σ_x는 시편의 두께 방향에 걸쳐 용접부에서 큰 인장값

을 보이고 폭 방향 성분 σ_y는 압축응력 상태를 보이며 두께방향 응력 성분 σ_z는 그 크기가 아주 작게 분포하였다. 또한 전압이 커질 경우 나머지 경우보다 용접부의 잔류응력의 분포 영역 및 값이 크게 나타났는데 이는 입열량의 크기에 기인한 결과로 사료된다.



(a) Specimen-01 (b) Specimen-02



(c) Specimen-03

Fig. 7 Welding Residual Stress

스트레인 게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하였으며 그 측정값을 Table 2에 나타내었다. 수치해석 결과와 비교해 보면 측정된 각 포인트의 값들이 유사함을 보임으로서 열탄소성 수치해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.

Table 2 Comparison of Simulation & Measured results

Point	Specimen 4		Specimen 5		Specimen 6	
	Simulation value	Experiment value	Simulation value	Experiment value	Simulation value	Experiment value
La-1	-10.3	-8.34	-10.7	-9.25	-11.7	-10.4
L-3	21.1	20.85	22.4	21.71	23.6	25.75
C-1	47.6	41.73	46.9	44.8	47.6	53.48
R-3	21.1	28.61	22.4	27.53	23.6	29.45
Ra-1	-10.3	-8.07	-10.7	-8.19	-11.7	-10.35

3.3 하이브리드 용접부의 기계적강도 특성

하이브리드 용접부에 대한 기계적 특성을 조사하기 위해 각각의 조건에 대하여 인장, 샤르피 충격 시험을 실시하였다.

3.3.1 샤르피 충격시험

Table 3은 0℃에서 longitudinal 방향으로 샤르피 충격 시험을 실시한 결과이다. 결과를 살펴보면 ASTM 기준인 25J이상의 충격치를 얻었으며 대체적으로 50~60J 사이의 충격치를 얻을 수 있었다. 용접부가 충격량 값이 크게 나타나는 이유는 파괴 경로가 용착금속부에서 모재로 그 경로가 변화하는 현상(FPD: Fracture Path Deviation)이 나타났기 때문이며 이는 하이브리드 용접부에서의 용착금속부와 열영향부의 폭이 좁은데 기인하는 레이저 용접의 특성으로 사료된다.

Table 3 Results of Charpy Impact Test

시험편 종류	충격 흡수 에너지(0℃, J)	
모재	77.62367	
Specimen 4	72.617	45.43067
Specimen 5	57.087	53.122
Specimen 6	66.79167	48.536

3.3.2 인장시험

인장시험의 경우 모든 시험편에서 파단이 용접부가 아닌 모재부에서 발생하였고 470~500 Mpa 사이의 인장강도를 갖는 것으로 보아 용접부는 건전하다고 판단되어지며 Table 4에 그 결과값을 나타내었다.

Table 4 Result of tensile test

시편 종류	파단강도(Mpa)	항복점(Mpa)
Specimen 4	484.9	339.4
Specimen 5	494.2	355.8
Specimen 6	484.1	338.9

5. 결 론

본 연구를 통하여 하이브리드 용접부의 최적화한 용접열원을 제시하고 이를 토대로 개발된 유한요소 프로그램을 통한 용접 열 분포 및 용접잔류응력 분포 특성 등의 용접이음부의 역학적 특성을 검토하였다. 그 결과 열 분포 특성에서는 실제 하이브리드 용접부에서의 열거동과 흡사한 형태를 보이고 스트레인게이지를 이용 X축에 대한 잔류응력을 측정하여 수치해석치와 비교한 결과 측정된 각 포인트의 값 들이 유사함을 보임으로서 수치해석의 재현성에 좋은 결과라 할 수 있겠다.